

空気超音波探触子の形状加工に関する基礎的検討

○東京工業大学 学生会員 月岡桂吾
 東京工業大学 正会員 古川 陽
 東京工業大学 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

高度経済成長期に建設された土木構造物は建設後 50 年以上が経過し、更新期を迎えている。これらの構造物の数は膨大であり、その点検・診断において、効率の良い非破壊検査手法が必要不可欠である。超音波探傷法は構造物内部を探傷する手法としてよく用いられているが、一般的には接触媒質を介して探触子から構造物へ波を伝搬させるため、検査効率が低いとされる。これに対して、空気超音波探傷法は空気を接触媒質とするため、検査の自動化などへの応用も含め、効率的な非破壊検査の実現に大きく貢献することが期待されている。

しかし、空気超音波探傷法には、空気と固体の音響インピーダンスの差が大きいため、両者の界面で超音波がほとんど反射されてしまうという欠点がある。したがって、これまで十分な送受信感度が得られず、実用化があまり進んでいなかった。近年は、探触子や計測機器の性能の向上により、鋼板材やパイプなどに適用範囲を広げているが、コンクリート構造物への適用はほとんどなされていない。

空気超音波探触子の送受信効率を向上させるために、発振子となる圧電素子と空気との間に整合層を挿入するのが一般的である。しかし、この整合層の設計は製作者の経験的な判断によって行われているのが実情である。

したがって、本研究では数値計算を用いて定量的に整合層の設計を行うことを目的とする。具体的には、探触子内部の圧電素子および整合層を対象として数値計算モデルを構築し、整合層の材料や形状をパラメータとしたパラメトリック解析を行った。このとき、探触子の性能が大きくなるようなパラメータを抽出し、そのときの送信波形および整合層の形状について検討を行った。

なお、解析手法としては圧電弾性体を対象とした周波数領域有限要素法 [1] を用いる。解析対象である圧電素子は圧電弾性体であるので、このような電気-機械結合系を対象とした有限要素法を用いることで、より実問題に近い数値計算モデルの構築が可能となる。

2. 数値計算モデル

数値計算モデルを図 1 に示す。既往の研究 [2] によって、探触子の送受信効率を向上させるためには、空気と隣接する整合層の音響インピーダンスを小さくすれば良いことが確認されている。音響インピーダンスは媒質の音速と密度

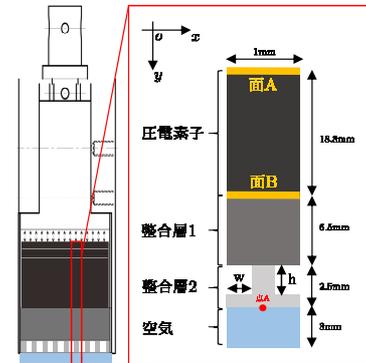


図 1 数値計算モデル

表 1 解析に用いる材料定数

材料	圧電素子	整合層 1	整合層 2	空気
密度 (kg/m ³)	7529	ρ_1	200	1.29
P 波速度 (m/s)	3770	2660	1000	340
ポアソン比	0.34	ν_1	ν_2	-

の積によって表されるので、本研究では、整合層 2 に切れ込みを入れることで密度を小さくする方法を提案する。

整合層に切れ込みを入れるとき、探触子内部の圧電素子および整合層は周期構造物になるので、周期構造を考慮して取り出した 1 ユニットを数値計算モデルとして取り扱う。したがって、数値計算モデルの側面には周期境界条件 [3] が適用される。さらに、空気層の底面には Mur の 1 次吸収境界条件を適用した。また、圧電素子両端の面 A および B を電極として、周波数 100kHz、電圧 100V の交流電圧を 10 周期分与えた。

解析に用いる材料定数を表 1 に示す。ただし、空気のポアソン比は 0.4999... とした。切れ込みの幅 w (mm) と高さ h (mm)、整合層 1 の密度 ρ_1 (kg/m³) とポアソン比 ν_1 、整合層 2 のポアソン比 ν_2 を、以下に示す範囲で変化させ、解析を行った。

- $0.3 \leq h \leq 2.4$, h のきざみ: 0.3
- $0.1 \leq w \leq 0.4$, w のきざみ: 0.1
- $200 \leq \rho_1 \leq 1100$, ρ_1 のきざみ: 50
- $0.00 \leq \nu_i \leq 0.49$, ν_i のきざみ: 0.05 ($i = 1, 2$)

このとき、点 A での y 方向変位の 100kHz 付近におけるフーリエ振幅を感度として評価し、探触子の感度がより大きくなるようなパラメータの組み合わせについて検討した。

表2 パラメトリック解析の結果

w	h	ρ_1	ν_1	ν_2	$ \tilde{u}_{mx} (\mu\text{m})$
0.1	2.4	1000	0.49	0.10	0.24
0.2	2.4	700	0.00	0.40	0.26
0.3	2.4	550	0.40	0.00	0.27
0.4	2.4	250	0.49	0.49	0.36

表3 市販の整合層

材料	整合層 1	整合層 2	$ \tilde{u} (\mu\text{m})$
密度 (kg/m ³)	550	200	0.16
P 波速度 (m/s)	2660	1000	

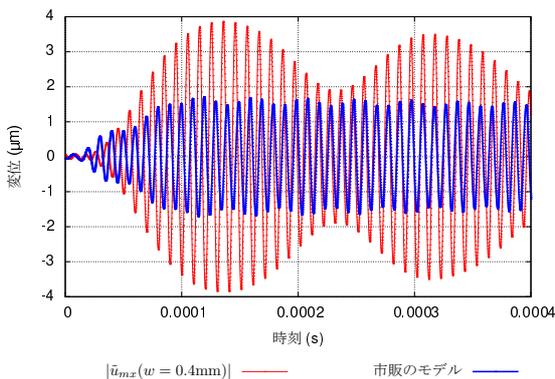


図2 探触子からの送信波形

3. 数値解析結果

(1) 送信波形に関する検討

はじめに、表2にそれぞれの w の値に対する応答の最大値 $|\tilde{u}_{mx}|$ と、そのときの h , ρ_1 , ν_1 および ν_2 の値を示す。パラメトリック解析の結果、 $w = 0.4\text{mm}$ における $|\tilde{u}_{mx}|$ が探触子の感度の最大値として得られた。また、市販の整合層の材料定数および、それを対象として有限要素解析を行った際の周波数応答 $|\tilde{u}|$ を表3に示す。このとき、市販の整合層は切れ込みを入れていない1次元モデルとなっており、整合層と空気の界面における鉛直方向変位のフーリエ振幅を周波数応答とした。

表2, 3を比較すると、 $w = 0.4\text{mm}$ のモデルは、市販のモデルよりも2倍程度振幅の大きい波動が送信出来る事が分かる。また、両モデル間の時刻歴波形の比較を図2に示す。図2から分かるように、切れ込みを入れることによって市販のモデルと比較して波動の振幅の増大が見込める一方で、波形が不安定となり、波形制御の面で課題が残ることが示された。

(2) 整合層の形状に関する検討

次に、具体的な切れ込みの入れ方について、言及する。図3に切れ込みの幅 w と高さ h に対する探触子の感度の変化を示す。横軸は切れ込みの高さ h を、また、縦軸は切れ込みの幅 w と高さ h に対する応答の最大値 $|\tilde{u}_{mx}(w, h)|$

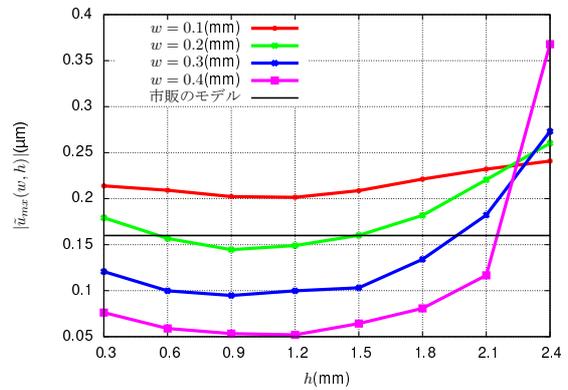


図3 w と h に対する探触子のフーリエ振幅の変化

を表す。市販の整合層は切れ込みを入れていない1次元モデルとなっているので、図3における比較によって、切れ込みを入れることによって探触子の感度が向上していることが分かる。

また、一般的には整合層の厚さが縦波の波長の4分の1のときにより強い波動が発生することが知られているが、図3の $h = 2.4(\text{mm})$ の場合の結果に着目すると、切れ込みの高さも縦波の波長の4分の1にするとよいこと、また、このとき切れ込みの幅が大きいほど探触子の性能が向上することが推察出来る。

4. 結論

本研究では、構造物の非破壊検査に用いられる空気超音波探触子を対象として、材料や形状をパラメータとしたパラメトリック解析を周波数領域有限要素法によって実行し、探触子の性能向上を試みた。

解析の結果、切れ込みを入れることによって市販のモデルと比較して、探触子の感度が約2倍向上することが分かった。さらに、切れ込みの高さは縦波の波長の4分の1に、また、そのときの切れ込みの幅をなるべく大きく設計すれば、より強い波動が得られる可能性が示唆された。

一方で、幾つかの課題も明らかとなった。第一に切れ込みを入れることによって波動の振幅が大きくなることを見込めるが、波形が不安定となることが示された。第二に特定の材料の場合しか、切れ込みを入れることによる性能の向上が見られないことが分かった。とりわけ、表2から分かるように、切れ込みの幅が大きくなるほど要求される整合層1の密度が小さくなり、実用化の点で課題が残ることが示された。今後は、上述の条件を考慮した最適化計算を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 加川幸雄, 山淵龍夫, 安藤英一: 圧電デバイスの有限要素モデルとシミュレーション, 丸善出版, 2014.
- 2) 萩尾亮斗, 古川陽, 廣瀬壮一: 遺伝的アルゴリズムを用いた空気超音波整合層の設計, 日本非破壊検査協会, 平成26年度秋季講演大会講演概要集, PP.63-64, 2014.
- 3) 藤間昌一, 深澤寧司, 田端正久: Finite Element formulation of Periodic Conditions and Numerical Observation of Three-Dimensional Behavior in a Flow, 数値解析研究所講究録, Vol.836, PP.113-119, 1993.